

Применение радиоголографического подхода к задаче идентификации групповых целей в РЛС X-диапазона

В. Е. Туров, А. С. Гвоздарёв, А. Н. Кренев, А. И. Полубехин, Е. М. Ильин

Выполнена экспериментальная апробация радиоголографического подхода применительно к задаче идентификации сложных составных радиолокационных объектов на базе полнополяриметрической реконфигурируемой РЛС X-диапазона. Решается задача локализации группы объектов, совершающих манёвр, а также определяются их геометрические размеры и взаимное расположение.

Ключевые слова: РЛС, X-диапазон, радиоголография, сложный радиолокационный объект.

1. Введение

Идентификация подвижных объектов является одной из ключевых задач радиолокации. Большинство существующих методов основываются на использовании определённой априорной информации [1, 2]. В частности, в импульсных РЛС с синтезированной апертурой [3] для восстановления радиолокационного изображения исследуемого объекта используется информация о траектории движения носителя РЛС [4], полученная путем геопозиционирования. Кроме того, траекторные параметры движения объекта, являющегося радиолокационной целью, уточняются после предварительной обработки с использованием алгоритмов селекции движущейся цели (СДЦ) и слежения за ней [5]. Однако на практике наибольший интерес представляют алгоритмы, позволяющие проводить идентификацию радиолокационных целей в условиях отсутствия априорной информации [6]. В качестве одного из возможных подходов к решению данной задачи может служить использование радиоголографического метода [7, 8].

2. Общее описание радиоголографического подхода

На сегодняшний день методы радиоголографии успешно используются в различных направлениях науки и техники, среди которых можно выделить: персональный и таможенный досмотр [9], подповерхностное зондирование [10], видение за оптически непрозрачными препятствиями [11], картографирование и геомониторинг [12], дефектоскопия [13], обнаружение и идентификация людей в условиях чрезвычайных ситуаций [14] и др. В ряде работ также предлагаются методы и системы, позволяющие использовать радиоголографический подход в радиолокационных наблюдениях [15–18].

В основе радиоголографического метода лежит идея полной регистрации пространственной структуры электромагнитной волны.

Пусть объект занимает некую область пространства V_o и его точки имеют координаты x, y, z . Гол로그램 регистрируется в области пространства V_g ; координаты точек, принадлежащих голограмме, обозначим x_1, y_1, z_1 .

Способность объекта отражать и рассеивать падающее на него излучение характеризуется комплексным коэффициентом отражения $\dot{R}(x, y, z)$:

$$\dot{R}(x, y, z) = |\dot{R}(x, y, z)| \exp[j\phi_R(x, y, z)], \quad (1)$$

где ϕ_R – фаза коэффициента отражения, показывает, насколько изменяется фаза волны при отражении от объекта.

Пусть $\dot{E}(x, y, z) = E_0(x, y, z) \exp[j\phi_0(x, y, z)]$ – амплитудно-фазовое распределение падающей на объект волны. Тогда рассеянное объектом поле в некоторой точке (x_1, y_1, z_1) области регистрации голограммы будет являться результатом преобразования [8]:

$$\dot{E}_1(x_1, y_1, z_1) = \iiint_{V_o} \dot{E}_0(x, y, z) \dot{R}(x, y, z) \dot{T}(x, y, z, x_1, y_1, z_1) dx dy dz, \quad (2)$$

где $\dot{T}(x, y, z, x_1, y_1, z_1)$ – ядро преобразования, зависящее от геометрии схемы получения голограммы.

Рассеянное поле объекта можно найти, применив обратное преобразование (процедуру обращения волнового фронта):

$$\dot{R}(x, y, z) \dot{E}_0(x, y, z) = \iiint_{V_g} \dot{E}_1(x_1, y_1, z_1) \dot{T}^{-1}(x, y, z, x_1, y_1, z_1) dx_1 dy_1 dz_1, \quad (3)$$

где $\dot{T}^{-1}(x, y, z, x_1, y_1, z_1)$ – ядро преобразования, обратное к ядру $\dot{T}(x, y, z, x_1, y_1, z_1)$.

В качестве изображения объекта определим функцию $\dot{R}(x, y, z)$.

$$\dot{R}(x, y, z) = (\dot{E}_0(x, y, z))^{-1} \iiint_{V_g} \dot{E}_1(x_1, y_1, z_1) \dot{T}^{-1}(x, y, z, x_1, y_1, z_1) dx_1 dy_1 dz_1. \quad (4)$$

Практически процесс получения изображения с помощью радиоголографии осуществляется следующим образом.

На первом этапе в передатчике формируется сигнал с требуемыми характеристиками, который делится на две части – излучаемую к объекту (объектную) и подводимую по закрытому каналу к приемнику (опорную). В известном методе радиоголографии [15–18] основным требованием к сигналу является его узкополосность, обеспечивающая высокую степень пространственной и временной когерентности излучаемых волн. На втором этапе излучающая система передатчика формирует электромагнитное поле, которым облучается объект. Рассеянное объектом поле в области регистрации голограммы формирует объектное поле. На третьем этапе объектное поле регистрируется антенной системой приемника. Поскольку для регистрации используются антенные решетки, элементы которых разнесены в пространстве, зафиксированное объектное поле является пространственно дискретным. На четвертом этапе результат интерференции зарегистрированного объектного поля и опорного сигнала проходит квантование, и таким образом получают отсчеты цифровой радиоголограммы, которые хранятся в памяти ЭВМ для последующего компьютерного восстановления изображения объекта. На пятом этапе производится компьютерное восстановление в соответствии с выражением (4). Заключительным этапом является цифровая обработка изображений с целью распознавания объекта и определения его характеристик.

Учитывая, что в дальнейшем для получения радиоголографических изображений используется вычислительная техника, выражение (4) можно представить и в дискретной форме.

Ядро преобразования $\dot{T}$, связывающее распределение поля в двух параллельных плоскостях (x, y) и (x_1, y_1) , расположенных на расстоянии d друг от друга, будет иметь вид [7]:

$$\dot{T}(x, y, z) = \frac{\exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + d^2}\right)}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + d^2}}, \quad (5)$$

где λ – длина волны излучения.

В частном случае, если геометрические размеры тела малы по сравнению с расстоянием d , то это вместе с условием малости площади наблюдения приводит к упрощению выражения (5) [7]:

$$\dot{T}(x, y, x_1, y_1) = \frac{1}{d} \exp\left(j \frac{2\pi d}{\lambda}\right) \exp\left(j \frac{\pi}{\lambda d} \left((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2\right)\right). \quad (6)$$

Тогда поле в плоскости регистрации голограммы можно записать в виде преобразования Фурье от комплексного коэффициента отражения объекта:

$$\dot{E}_1(x_1, y_1) = \iint_{S_0} \dot{R}(x, y) \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda d} \left[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2\right]\right\} dx dy. \quad (7)$$

Восстановление волнового поля, или процесс получения радиоголографических изображений, будет аналогичен обратному преобразованию Фурье:

$$\dot{R}(x, y) = \iint_{S_g} \dot{E}_1(x_1, y_1) \exp\left\{-j \frac{\pi}{\lambda d} \left[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2\right]\right\} dx_1 dy_1. \quad (8)$$

Восстановленное таким образом изображение будет отличаться от оригинала на величину ошибок, появляющихся при дискретизации и квантовании на этапах записи и восстановления.

Метод классической радиоголографии, основанный на выражениях (1)–(8), предполагает использование монохроматического излучаемого сигнала для возможности когерентной регистрации объектного поля относительно опорной волны. При этом повышение разрешающей способности по дальности достигается за счёт использования многочастотной радиоголографии с перестройкой частоты по определённому закону (наиболее часто используется дискретная перестройка частоты на заданной сетке частот).

Стоит также отметить, что в современной радиоголографии используется преимущественно подведение опорного сигнала по закрытому тракту или искусственное синтезирование опорной волны, таким образом, в результате задача регистрации амплитуды и фазы интерференционного поля сводится к задаче когерентной регистрации мгновенных значений объектного поля. Развитие современной аппаратной базы позволяет решить данную задачу и для миллиметрового диапазона длин волн. Во многом именно по этой причине в последнее время большое внимание уделяется также возможности использования в радиоголографии сверхширокополосных (СШП) сигналов [19, 20]. В этом случае когерентная регистрация относительно некоторой гармонической опорной волны (классический подход) теряет смысл, поэтому будем в дальнейшем называть такую обработку квазирadiоголографической. При этом важно отметить, что на больших расстояниях (в плоских волнах) классическая многочастотная радиоголографическая обработка (см. Фурье-приближение, (8)) будет эквивалентна обработке изображений в СШП радиолокационных станциях с синтезированной аппаратурой [21]. В связи с чем в качестве основы квазирadiоголографического подхода будем использовать отдельные этапы обработки СШП-изображений [22] применительно к задаче идентификации групповых радиолокационных целей.

3. Обработка результатов натурного эксперимента

3.1 Описание экспериментальной установки

Для экспериментальной апробации квазирадииолографического подхода применительно к задаче идентификации групповых радиолокационных целей были использованы данные натурного эксперимента, полученные с использованием широкополосной полнополяриметрической моноимпульсной радиолокационной станции с нефиксированной конфигурацией [23]. Под идентификацией групповой цели подразумевается определение количества одиночных сосредоточенных объектов, их размера и взаимного расположения.

В качестве одиночных объектов были выбраны проводящий металлизированный шар, диаметром 0.26 м и трёхгранный уголкоый отражатель с длиной ребра 0.3 м, расположенные на концах диэлектрической штанги длиной 1.3 м. Объект, расположенный перед несущей стеной здания, вращался относительно своего центра, совершая 1 неполный оборот за время анализа (3 мин.). Логика выбора объектов была продиктована попыткой совмещения в рамках сложной составной цели слабо отражающих элементов, приблизительно равномерно рассеивающих падающее электромагнитное излучение во всём диапазоне углов (металлизированный шар), и хорошо отражающих объектов, но видимых в ограниченном секторе углов падения (уголкоый отражатель). Стена формировала мощную помеху переотражения и имитировала подстилающую поверхность. Схема эксперимента изображена на рис. 1.

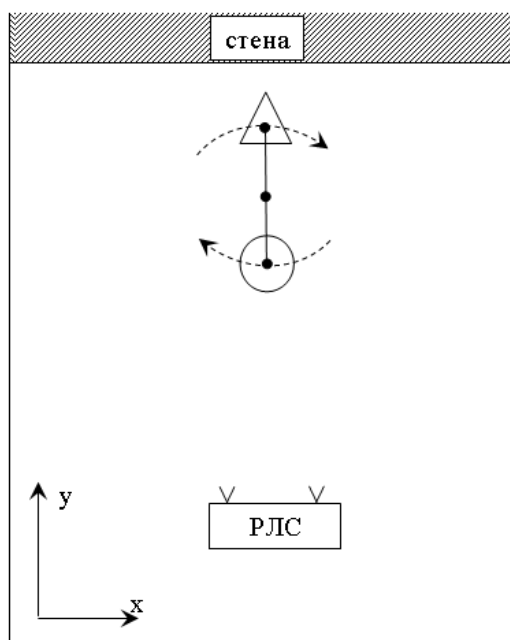


Рис. 1. Схема эксперимента

Приёмопередающая часть неподвижной установки сформирована четырехэлементной антенной системой, состоящей из двух приёмников (расположенных горизонтально с базой 0.3 м) и двух передатчиков (расположенных также горизонтально с базой 0.3 м). Количество ракурсов наблюдения – 750 с шагом $\sim 0.3^\circ$ (600 ракурсов на пол-оборота). Излучаемый сигнал – СШП-радиоимпульсы длительностью 3.3 нс с периодом повторения 0.512 мкс. Регистрация проводилась на опорной частоте 9.777 ГГц на основе внутрипериодной дискретизации с шагом 0.48 нс. Регистрировался сигнал для всех комбинаций приёмных и передающих антенн (работающих по отдельности) на двух взаимно ортогональных поляризациях – вертикальной и горизонтальной. Фиксировалась амплитуда на выходе приёмника в целочисленном восьмиразрядном представлении (0–255).

3.2 Результаты обработки экспериментальных данных

Так как предоставленные данные определяли лишь вещественную часть в целочисленном беззнаковом представлении, они центрировались и дополнялись до аналитического сигнала. Для этого на предварительном этапе центрированные данные пропускались через построенный фильтр Гильберта, восстанавливающий квадратурную составляющую сигнала [1]. Над результатом проводилась согласованная фильтрация [3]. Пример реализации эхосигнала после предобработки представлен на рис. 2.

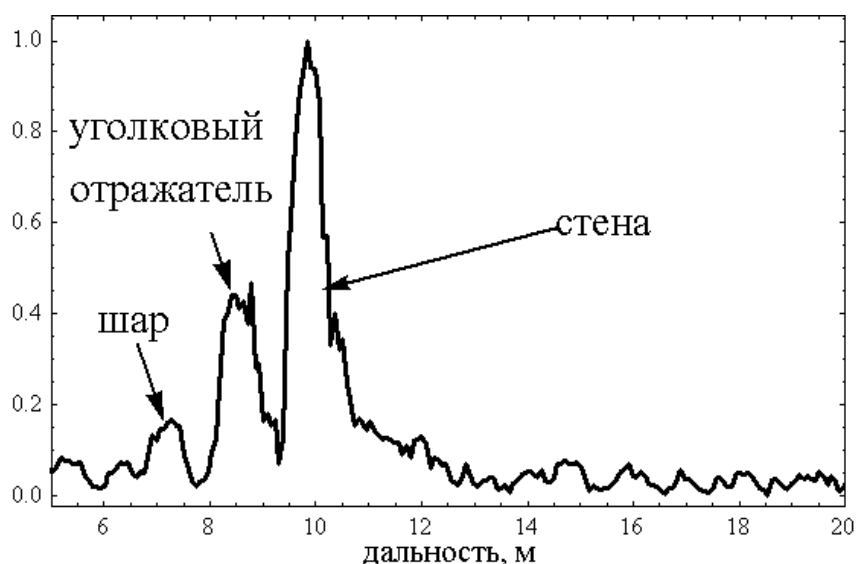
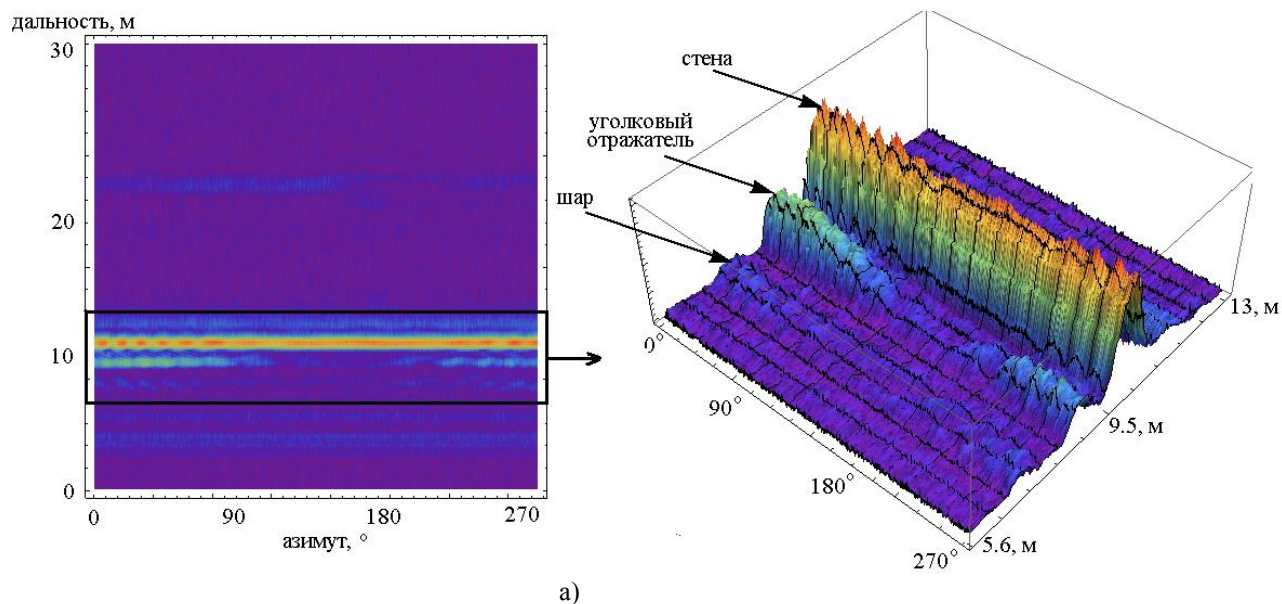
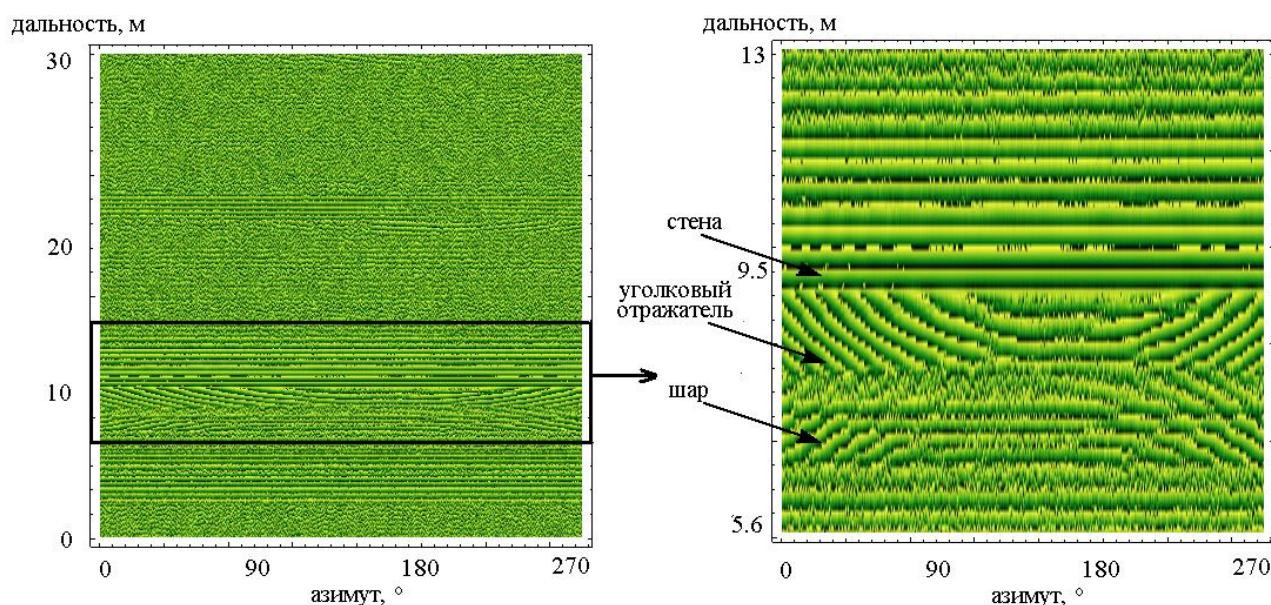


Рис. 2. Пример нормированной огибающей эхо-сигнала после согласованной фильтрации аналитического сигнала, восстановленного фильтром Гильберта по исходным данным

На основе отдельных эхо-сигналов формировалось растровое изображение, амплитудная и фазовая компоненты которого представлены на рис. 3 а) и б) соответственно. Для наглядности в изображении приведены все ракурсы наблюдения (750) и первые 400 отсчетов дальности, что соответствует диапазону дальностей от 0 до 30 м и диапазону углов от 0° до 270° . Отдельно вынесена область расположения объекта (100 отсчетов, что соответствует 6.4 м), подробно демонстрирующая наличие закономерностей поведения амплитуд и фаз сигналов, отражённых от исследуемых подвижных объектов и стационарных отражателей.



а)



б)

Рис. 3. Пример фрагмента а) амплитудного и б) фазового растрового изображения эхо-сигналов (размером 750×400 отсчётов) с детальным фрагментом (750×100 отсчётов), соответствующим области расположения объекта

Анализ полученных амплитудных изображений демонстрирует существенно больший уровень сигнала, отражённого от стационарного отражателя (стена), по сравнению с полезной компонентой, отражённой от исследуемого объекта. Вследствие чего требуется дополнительная обработка, позволяющая подавить данную помеху.

В современной радиоголографии в задачах видения за оптически непрозрачными препятствиями существует ряд подходов, позволяющих фильтровать отражения от них.

В частности, в числе наиболее просто реализуемых и эффективных подходов можно отметить метод, основанный на пространственной фильтрации постоянной составляющей [11, 24], а также использующий фильтрацию на основе метода главных компонент [25, 26].

Сложность непосредственной реализации первого подхода для рассматриваемой экспериментальной установки заключается в необходимости её перемещения относительно стационарного отражателя. Также важно отметить, что для случая неподвижного положения экспериментальной установки и компенсации фазовых искажений при использовании преобразования Фурье (для восстановления изображения) сигналы идентифицируемых объектов переместятся на нулевую пространственную частоту, которая и должна быть отфильтрована в алгоритмах, рассматриваемых в [11, 25]. Второй подход основывается на собственном разложении радиоизображения и удалении первой собственной компоненты (ей соответствует наибольшая мощность). Однако одновременно с достигаемой высокой степенью подавления сигнала, отражённого от стационарных объектов, несколько искажается фазовая структура, что является существенным ограничением для проведения дальнейшей компенсации фазовых набегов (фокусировки изображения). В связи с чем для фокусировки было использовано комбинированное изображение, амплитудная составляющая которого была получена в результате фильтрации по методу главных компонент, а фазовая соответствовала исходному изображению.

Компенсация фазовых набегов, появляющихся при движении объекта, проводилась путём вычитания восстановленной развёрнутой (для каждого эхо-сигнала) фазы. Результирующее изображение объекта формировалось покомпонентной Фурье-обработкой [22] с последующей пороговой фильтрацией.

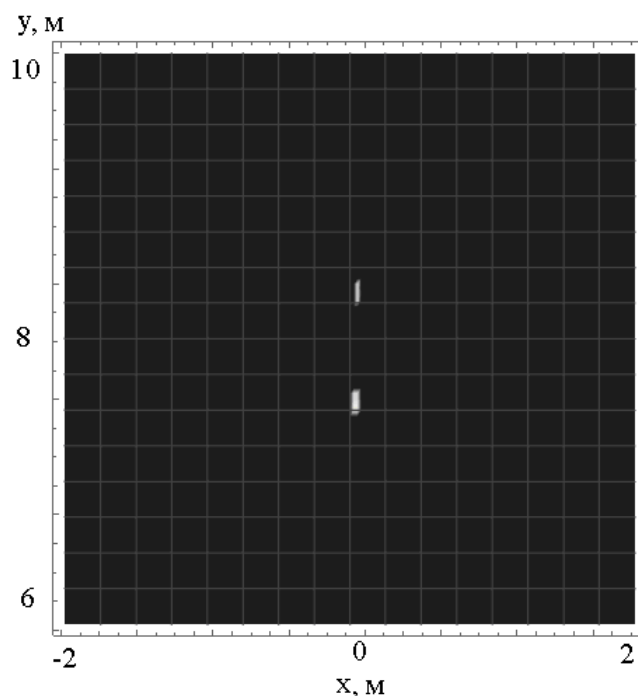


Рис. 4. Фрагмент восстановленной сцены в окрестности нулевой пространственной частоты

На рис. 4 представлен фрагмент восстановленной сцены в окрестности нулевой пространственной частоты. По полученному изображению можно оценить размеры (каждый объект – 3 отсчёта) и их пространственный разнос (18 отсчётов). С учётом того, что разрешающая способность системы в указанной конфигурации составляет 0.075 м, это соответствует 22.5 см и 1.35 м. Размеры объекта определяются областью локализации «блестящей точки», поскольку каждый объект (металлизированный шар и уголкового отражатель) является точечным отражателем. Оцененное расстояние между объектами отличается от истинного на 5 см (3.7 %), что показывает высокую эффективность разработанного квазирадиологического метода применительно к задаче идентификации групповых целей в РЛС X-диапазона.

Полученные результаты демонстрируют возможность идентификации маневрирующих сложных составных радиолокационных объектов квазирадиологическим методом на основе обработки когерентно зарегистрированного отражённого СШП-сигнала в РЛС, расположенной на стационарной позиции.

Литература

1. *Сосулин Ю. Г.* Теоретические основы радиолокации и радионавигации: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1992. 304 с.
2. *Anderson S. J.* Target classification, recognition and identification with HF radar // Proceedings of the NATO Research and Technology Agency Sensors and Electronics Technology Panel Symposium SET-080/RSY17/RFT: «Target identification and recognition using RF systems», Oslo, Norway, 11–13 October, 2004. P. 1–20.
3. *Бакулев П. А.* Радиолокационные системы: учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2007. 376 с.
4. *Верба В. С.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
5. *Тяпкин В. Н.* Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Красноярск: СФУ, 2011. 535 с.

6. Вопросы перспективной радиолокации: монография / под ред. А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. 285 с.
7. Сафронов Г. С., Сафронова А. П. Введение в радиоголографию. М.: Сов. радио, 1974. 288 с.
8. Бахрах Л. Д. Голография в микроволновой технике. М.: Сов. радио, 1979. 320 с.
9. Sheen D. M., McMakin D. L., Hall T. E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Sep 2001. V. 49. № 9. P. 1581–1592.
10. Yoon Y.-S., Amin M. G. Spatial filtering for wall-clutter mitigation in through-the-wall radar imaging // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. № 47. P. 3192–3208.
11. Артёмова Т. К., Гвоздарёв А. С. Минимально-фазовый метод эталонной оценки размеров объектов в задачах радиоголографии // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2011. № 4. С. 22–30.
12. Балтер Б. М., Ведешин Л. А., Егоров В. В. Аэрокосмический радиолокационный мониторинг Земли. М.: Радиотехника, 2006. 240 с.
13. Razevig V. V., Ivashov S. I., Vasiliev I. A., Zhuravlev A. V., Bechtel T., Capineri L., Falorni P. RASCAN Holographic Radars as Means for Non-Destructive Testing of Buildings and Edificial Structures // Proceedings of the Structural Faults and Repair, Edinburgh, Scotland, UK, June 15–17. 2010. P. 1–10.
14. Матюхин Н. И. Системная теория динамических радиоголографических информационных систем наблюдения потока объектов в ситуациях конфликта. Харьков: ХНУ имени Каразина В. Н., 2007. 417 с.
15. Барышев И. В., Горобец Н. Н., Матюхин Н. И. Адаптивные свойства радиоголографических информационных систем // Вісн. Харк. нац. ун-ту. Радіофізика та електроніка. 2010. № 927. С. 8–53.
16. Матюхин Н. И. Синфазное суммирование пространственных и временных гармоник в многочастотной и многопозиционной пространственно-когерентной (радиоголографической) системе для получения трехмерного изображения объекта с разрешением порядка длины волны // Вісн. Харк. нац. ун-ту. Радіофізика та електроніка. 2011. № 966. С. 68–71.
17. Гончаров О. П., Понькин В. А. Способ активной радиолокации // Патент России № 2498339. 2013. Патент России № 2012107869/07. Бюл. № 31.
18. Yoon Y.-S., Amin M. G. Spatial filtering for wall-clutter mitigation in through-the-wall radar imaging // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. V. 47, №. 9. P. 3192–3208.
19. Huang Q., Qu L., Wu B. and Fang G. UWB through-wall imaging based on compressive sensing // IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing. 2010. V. 48, № 3. P. 1408–1415.
20. Якубов В. П., Шитлов С. Э., Суханов Д. Я., Разинкевич А. К. Сверхширокополосная томография удаленных объектов // Дефектоскопия. 2012. № 3. С. 59–65.
21. Curlander J. C., McDonough R. N. Synthetic Aperture Radar, Wiley Series in Remote Sensing. 1991. 647 p.
22. Лобжанидзе Д. Т., Сазонов В. В. Модификация классических алгоритмов формирования РЛИ при синтезировании апертуры для формирования изображений движущихся объектов // Международная конференция «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 19–21 апреля, 2016. Т. 3. С. 1082–1096.
23. Кабачев Д. С., Погребной Д. С., Фасоляк Е. А., Туров В. Е., Зюзин А. В., Крнев А. Н. Физическая модель широкополосной полнополяризметрической моноимпульсной радиолокационной станции с нефиксированной конфигурацией // Патент России № 139876. 2014. Патент России № 2122745.1998. Бюл. № 12.
24. Ahmad F., Amin M. G. Wall clutter mitigation for MIMO radar configurations in urban sensing // Proceedings of the 11th International Conference on Information Science, Signal Processing, and their Applications, Montreal, Canada, July 2012. P. 1165–1170.

25. Wang W., Zhang B., Mu J. Compressive SAR raw data with principal component analysis // EURASIP Journal of Wireless Communication Networks. 2012. P. 1–7.
26. Gouaillier V., Gagnon L. Ship silhouette recognition using principal components analysis // Proceedings of SPIE Conference on Applications of Digital Image Processing XX. V. 3164, San Diego, CA, July 30 – August 1, 1997. P. 59–69.

Статья поступила в редакцию 18.04.2016

Туров Виктор Евгеньевич

д.т.н., профессор кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий инженер научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150000, Ярославль, ул. Советская, д. 14, лаб. 308), тел. (4852) 72-51-53, e-mail: victorturov@gmail.com.

Гвоздарёв Алексей Сергеевич

к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры радиофизики ЯрГУ им. П. Г. Демидова (150000, Ярославль, ул. Советская, д. 14, лаб. 105), тел. (4852) 79-77-69, e-mail: a.gvozdarev@uniyar.ac.ru.

Крнев Александр Николаевич

к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем ЯрГУ, ведущий научный сотрудник научной лаборатории ИТТ ЯрГУ (150000, Ярославль, ул. Советская, д. 14, лаб. 308), тел. (4852) 72-51-53, e-mail: krenev@uniyar.ac.ru.

Полубехин Александр Иванович

к.т.н., руководитель инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), тел. 8-925-821-06-31, e-mail: polub1980@mail.ru.

Ильин Евгений Михайлович

д.ф.-м.н., профессор, ведущий аналитик инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), e-mail: evgil45@mail.ru.

Application of microwave imaging technique for multiple target identification in X-band radars

Victor E. Turov, Alexey S. Gvozdarev, Alexander N. Krenev, Alexander I. Polubekhin, Eugene M. Il'yin

Experimental study of microwave imaging technique application for complex composite target identification is considered. X-band fully polarimetric radar processing is performed for the problem of maneuvering group target localization including individual target (within the group), its size and relative position estimation.

Keywords: radar sensing, X-band, microwave imaging, composite radar target.